第64卷 第4期　　　天 文 学 报　　　Vol. 64 No. 4
2023年7月　　　ACTA ASTRONOMICA SINICA　　　Jul., 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.04.008

基于CSST多色测光的时序测光精度分析*

王婉妤[1,2,3]　刘慧根[1,2,3†]　周济林[1,3]

(1 南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)
(2 平湖实验室(北京无线电测量研究所) 平湖 314000)
(3 现代天文与天体物理教育部重点实验室 南京 210023)

摘要 中国巡天空间望远镜(Chinese Survey Space Telescope, CSST)是中国的首个大型空间光学望远镜, 将对包括系外行星探测在内的诸多科学目标开展研究, 有望取得前沿科学进展. 时序测光精度是CSST重要的性能指标, 受到物理噪声和仪器噪声的影响, 需要通过数值模拟对其分析和评估. 模拟基于目前公布的CSST主要技术参数, 建立了时序的恒星信号和噪声模型, 以CSST的i波段为例, 分析凝视观测模式下的测光精度. 通过数值仿真, 展示了孔径测光中各项噪声的贡献, 特别是由指向抖动和像素响应不均匀性导致的抖动噪声. 模拟结果还给出了测光孔径的推荐范围. 为了获得更高的信噪比, 可以减小仪器抖动振幅和像素不均匀性, 或者采用参考星较差测光的方式. 结果为CSST后续的时序测光精度与不同指标参数的相关性分析、系外行星探测能力评估以及测光数据处理提供了模拟数据的支撑.

关键词 望远镜, 行星和卫星: 探测, 技术: 测光, 方法: 数值

中图分类号: P141;　**文献标识码**: A

1　引言

在过去的二十多年中, 系外行星领域取得了巨大的进展. 借助Kepler[1]、TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)[2]等多项空间任务, 截至2023年5月16日, 已有5419颗系外行星被证认[1]. 凌星法是目前运用最广泛的系外行星探测方法, 可以给出行星轨道和行星-恒星半径比等信息. 基于Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics)[3]、LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope)[4]等望远镜提供的恒星基本参数, 我们可以得到行星更准确的半径、质量等信息. 随着系外行星样本的扩大, 系外行星的大气特征刻画也成为研究的热点. 对系外行星大气的研究目前主要来自凌星行星的透射光谱观测, 即行星在经过其主星前方的凌星过程中, 部分恒星光透过行星大气, 表现出与波长相关的吸收特征. 通过测量凌星时的透射光谱, 可以推断行星大气特性, 如行星的化学成分、温度-压强结构、云霾存在等. 无论系外行星探测还是行星大气刻画都需很高的测光精度.

中国巡天空间望远镜(Chinese Survey Space Telescope, CSST)的科学目标之一是对系外行星开展多波段测光和光谱观测研究, 获得系外行星系统的大气光谱, 为未来寻找和确认系外生命特征信号

2022-06-08收到原稿, 2022-06-20收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11973028、11933001), 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项科学研究项目(CMS-CSST-2021-B12、CMS-CSST-2021-B09), 十四五民用航天基金项目(D050105)资助

†huigen@nju.edu.cn

[1]https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/

奠定重要基础. CSST的主光机是一个2 m口径的离轴三反消像散(three-mirror anastigmat, TMA)光学系统, 后端仪器包括了多色成像和无缝光谱巡天模块、多通道成像仪、积分视场光谱仪、系外行星成像星冕仪、高灵敏度太赫兹模块等[5]. 本文将基于CSST的多色成像测光观测, 对CSST的测光精度进行模拟分析.

测光的精度受到多种因素影响, 例如恒星表面的黑子和热斑等导致恒星表面不均匀引起的光度变化[6]. 更多地, 测光精度受到多种物理和仪器噪声的干扰, 例如天光背景、仪器指向抖动、像素不均匀性等. 噪声的大小会直接体现在后续测光或光谱探测的信噪比中, 进而影响行星的探测以及行星大气的光谱反演[7], 因此对噪声进行准确的模拟并尽可能地对其进行校正是十分必要的. 此前, 有一些工作针对PLATO (PLAnetary Transits and Oscillations of stars)、TESS和JWST (James Webb Space Telescope)等科学仪器的恒星光变曲线进行了模拟[8–10]. 在这里我们主要基于CSST的基本参数, 对恒星信号和噪声建模, 从而计算测光信噪比. 该模拟方法对光谱信噪比计算同样适用, 可以应用在光谱信噪比估计中.

在本工作中, 我们模拟了CSST的恒星信号和各项噪声, 特别讨论了仪器抖动和像素不均匀性对测光观测精度的影响, 为后续CSST的参数设计和数据处理模式以及CCD选型做准备. 第2节描述了信号和噪声模拟的计算模型; 第3节介绍了本文使用的参数和测试结果; 第4节总结了本文工作并对未来可以继续进行的研究展开讨论.

2 测光精度计算方法

本节主要描述CSST测光精度模拟的计算框架和算法. 模拟分为3个部分. 首先, 通过恒星能谱和视星等(AB星等)计算恒星的辐射流量, 并通过CSST仿真数据得到点扩散函数(point spread function, PSF), 考虑像素响应函数(pixel response function, PRF)和仪器抖动(jitter)的影响, 通过卷积获得模拟的恒星信号. 随后, 对泊松噪声、天光背景、暗电流、读出噪声、稳定性误差等噪声项进行建模和计算. 最后, 计算孔径测光信噪比(signal to noise ratio, SNR).

2.1 CCD上的恒星信号模拟

2.1.1 恒星辐射流量

在望远镜入瞳的位置处, 恒星波长λ处辐射的流量密度$F_{\rm obs}(\lambda)$ (单位为$\rm erg\cdot s^{-1}\cdot cm^{-2}\cdot nm^{-1}$)可由该波段的AB星等$m_{\rm s}$计算得到, 即:

$$F_{\rm obs}(\lambda)=10^{-0.4\,m_{\rm s}}F_0\,, \tag{1}$$

其中, F_0为该波段的零星等流量. $F_{\rm obs}(\lambda)$或可由恒星模型流量密度谱$F_{\rm s}(\lambda)$计算得到, 即:

$$F_{\rm obs}(\lambda)=F_{\rm s}(\lambda)\left(\frac{R_{\rm s}^2}{d^2}\right)\,, \tag{2}$$

其中, $R_{\rm s}$为恒星半径、d为恒星距望远镜的距离.

设恒星光子入射到有效面积为$A_{\rm tel}$的望远镜上, 经过模块效率为η_λ (含光学元件和探测器)的调制, 则CCD (charge-coupled device)单位时间内接收的电子数(单位为$\rm e^-\cdot s^{-1}$)为:

$$n_{\lambda,\rm s}=F_{\rm obs}(\lambda)A_{\rm tel}\eta_\lambda/\left(\frac{hc}{\lambda_{\rm c}}\right)\Delta\lambda\,, \tag{3}$$

其中, h为普朗克常数、c为光速、$\frac{hc}{\lambda_{\rm c}}$为观测波段中心波长$\lambda_{\rm c}$处的光子能量、$\Delta\lambda$为观测波段的带宽.

2.1.2 PSF模型

恒星经过望远镜光路, 在焦平面上形成的星象轮廓可用其PSF表征, PSF与视场位置和波长都相关. CSST项目组发布的主巡天模块Cycle 5数据产品提供了PSF静态仿真数据, 在光学设计模型的基础上, 考虑了镜面加工、装调、CCD不平整度、重力变化和热变形等误差因素, 给出了视场不同位置处各波段的静态PSF数据. 本文为了研究不同抖动参数的影响, 采用了静态PSF数据, 作为后续模拟动态PSF (加入像素响应不均匀性和抖动的影响)的基础.

CSST提供的PSF静态仿真数据, 在焦平面的每个探测器上, 对均匀分布的30×30个视场位置进行了采样, 以保证PSF的插值精度. 另外, 在多色成像的每个波段内, 提供了4个典型波长的采样, 展示PSF对不同波长的依赖关系.

在给定波长的情况下, 可以根据不同视场的PSF采样, 通过插值的方法得到视场内任意位置

处的PSF. 在CSST的PSF仿真中, 采用的是IDW (inverse-distance weighting)插值[11]方法, PSF场连续变化, 任一位置处的PSF由其周围的4个相邻点的PSF采样插值给出, 插值权重与距离的平方成反比. 图1显示了i波段中一个典型波长(706.1 nm)在位置(0, 0)处插值得到的PSF. 每个PSF给出了256×256像素空间上的能量分布, 采样的像素大小为5 μm. 图中的横纵坐标表示PSF在x-y像素平面上的位置坐标. 为了提高计算效率, 我们没有对不同波长的PSF进行插值累加, 在观测波段较窄的情况下, 可以选择典型波长近似代替整个波段的PSF (详见第3节).

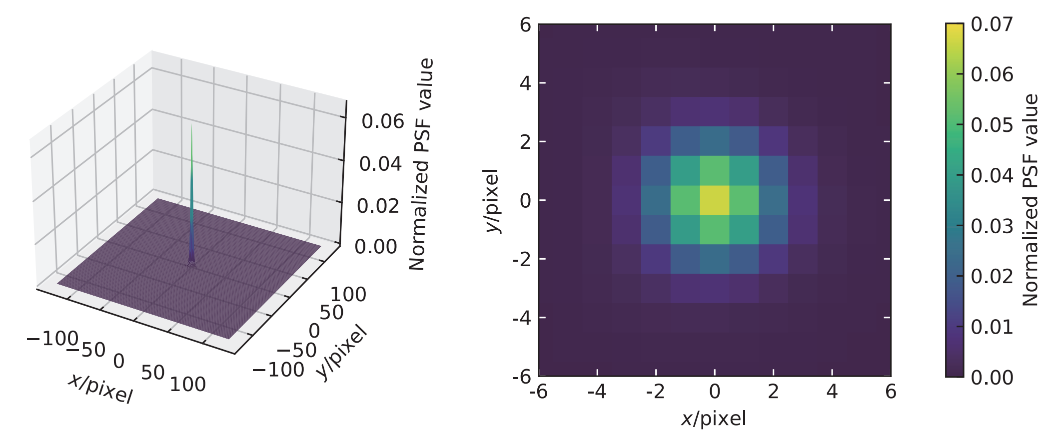


图 1 PSF插值仿真示意图. 左: 全空间256×256范围内的PSF分布图. 右: 12×12范围内的PSF分布图, 覆盖了目标源91.9%的光子能量. 横纵坐标x、y表示PSF在x-y像素平面上的位置坐标.

Fig. 1 Simulated PSF distribution using interpolation. Left: PSF distribution in an area of 256×256 pixels. Right: PSF distribution in an area of 12×12 pixels, covering 91.9% photos energy of the target star. The positional coordinates of the PSF on the x-y pixel plane are represented by the horizontal and vertical axes, labeled as x and y, respectively.

2.1.3 像素响应函数(PRF)模型

恒星流量在CCD上的数值受到PRF的影响. PRF在像素内部不同位置及不同像素之间存在差异, 分别称为像素内不均匀性和像素间不均匀性. 因此, 目标恒星在计算流量和PSF后, 还需与PRF做卷积, 获得探测器上最终读数.

如果望远镜指向稳定, 我们可以通过测量平场来改正像素间响应的不均匀性. 但结合下文2.1.4节所述的仪器抖动的影响, 像素不均匀响应将与抖动误差相耦合, 带来测光噪声.

CSST探测器性能目前尚未确定, 本文采用Kepler探测器在相应波段的像素模型[12], 将每个像素划分为45×45的亚像素采样, 计算探测器不同像素位置处的响应情况. 图2左图显示了700 nm波长处的像素内响应函数(intra-pixel response function, IPRF), 右图在左图响应函数的基础上给不同像素增加了1%的随机差异.

2.1.4 仪器抖动影响

CSST在轨观测期间, 由于微振动环境和精密稳像残差导致仪器会在一定频率上产生小幅度的抖动, 使得星象在CCD上的位置发生偏移, 从而使目标源对应的PSF和PRF都发生变化, 对恒星信号产生影响. 为了分析抖动引起的恒星信号的时序变化, 本文采用数值模拟来分析抖动叠加PRF带来的测光误差.

首先通过二维随机游走原理生成抖动序列. 从平面上起始坐标为(x_0, y_0)的一点出发, 每经过Δt的时间随机游走一步. 设每一步x、y方向上的分量Δx_i、Δy_i均符合均值为0, 方差为σ_0^2的高斯分布. 由中心极限定理可知, n ($n \gg 1$)步之后, 即$t = n\Delta t$时刻, x、y方向上的总分量均符合高斯分布. 设Δx_t、Δy_t分别为t时刻抖动序列的x、y分量, 则$\Delta x_t = \sum(\Delta x_i)$、$\Delta y_t = \sum(\Delta y_i)$均$\sim N(0, n\sigma_0^2)$. 位移$R = \sqrt{(\Delta x_t)^2 + (\Delta y_t)^2}$则服从瑞利分布, 概率

密度函数为:

$$P(R)=\frac{1}{n\sigma_0^2}R\mathrm{e}^{-\frac{1}{2n\sigma_0^2}R^2}\,.$$

图3显示了由CSST抖动指标(0.05″@300 s)生成的300 s内的一组随机抖动序列. 我们取时间步长$\Delta t=0.05$ s, 则单次抖动的x、y方向分量符合均值为0, 标准差为$\sigma_0\approx0.007$ pixel的高斯分布.

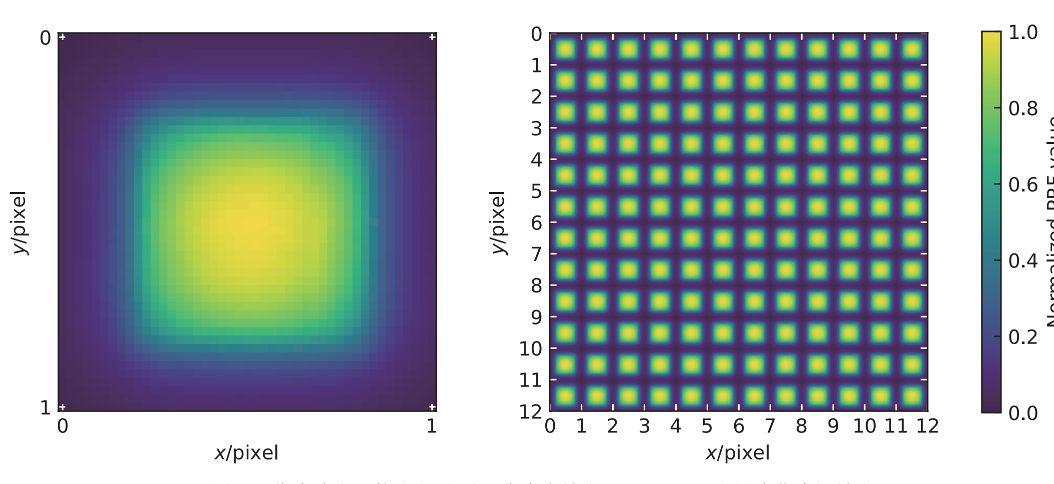


图 2　像素响应函数分布图. 左: 像素内效应. 右: 12×12范围内像素间效应.

Fig. 2　Simulated PRF distribution. Left: Intra-pixel effect. Right: Inter-pixel effect in an area of 12×12 pixels.

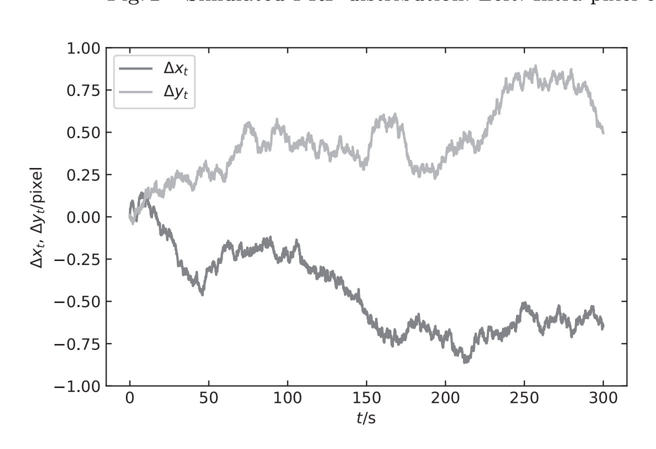


图 3　由CSST抖动指标(0.05″@300 s)生成的300 s内的一组随机抖动序列

Fig. 3　A sample random array in 300 s for jitter simulation based on the jitter technical parameters (0.05″@300 s) of CSST

结合上述仪器抖动的影响, 将恒星在CCD上的位置随时间的变化描述为:

$$\begin{cases}x_t=x_0+\Delta x_t\,,\\ y_t=y_0+\Delta y_t\,.\end{cases}\tag{4}$$

在每个时刻t, 目标源的点扩散函数为(x_t,y_t)位置处对应的PSF, 且由于星象落在不同的像素上, 对应的PRF也不同. 经过长的曝光时间$t_{\rm obs}$, 最终CCD对该目标源的读数表现为积分效应, 像素(x,y)处接收到的总的电子数(单位为e$^-$)为:

$$N_{\lambda,\rm s}=\int_0^{t_{\rm obs}}n_{\lambda,\rm s}*\mathrm{PSF}(x,y)*\mathrm{PRF}(x,y)\mathrm{d}t\,,\tag{5}$$

其中, $*$表示卷积, $n_{\lambda,\rm s}$为恒星辐射对应的电子流量, 由(3)式给出, 点扩散函数PSF(x,y)和像素响应函数PRF(x,y)分别由2.1.2节和2.1.3节给出.

2.2　噪声计算

2.2.1　散粒噪声

通过测量望远镜处的光强给出的是接收光子的平均数量, 望远镜任一时刻接收的光子数满足泊松分布, 因此散粒噪声也称之为泊松噪声(Poisson noise). 泊松噪声在粒子数足够大时趋向于正态分布, 其标准差等于光子数的平方根. 对于特定的观测系统和波长, 探测器产生的电子数正比于其接收到的光子数, 因此有:

$$\sigma_{\rm PS} = \sqrt{N_{\lambda,\rm s}}\,, \tag{6}$$

其中, $N_{\lambda,\rm s}$由(5)式给出.

2.2.2 天光背景噪声

影响CSST测光观测的主要天光背景来源于黄道光(Zodiacal light). Pascale等[13]通过下式模拟黄道光的反射与发射分量的总和(单位为W · m^{-2} · μm^{-1} · sr^{-1}):

$$I_{\rm Zodi}(\lambda) = \beta[3.5\times10^{-14}B_\lambda\,(5500{\rm K}) + 3.58\times10^{-8}B_\lambda\,(270{\rm K})]\,, \tag{7}$$

其中, B_λ (5500 K)和B_λ (270 K)分别为5500 K和270 K温度下的普朗克黑体辐射强度, β是与黄纬有关的参数, Sarkar等[10]提出用如下多项式对其进行拟合:

$$\beta = -0.22968868\zeta^7 + 1.12162927\zeta^6 - 1.72338015\zeta^5 + 1.13119022\zeta^4 - 0.95684987\zeta^3 + 0.2199208\zeta^2 - 0.05989941\zeta + 2.57035947\,, \tag{8}$$

其中, $\zeta = \lg(l_{\rm ecl}+1)$, $l_{\rm ecl}$为黄纬(单位为°).

我们取β的平均值为1.3, 则(7)–(8)式计算出的黄道光与HST[14]给出的黄道光平均值22.7 mag · arcsec^{-2}基本一致.

CCD单个像素、单位时间因黄道光辐射产生的电子数(单位为e$^-$ · s^{-1} · pixel^{-1})为:

$$n_{\rm Zodi} = I_{\rm Zodi}A_{\rm tel}\Omega_{\rm pix}\eta_\lambda/\left(\frac{hc}{\lambda_{\rm c}}\right)\Delta\lambda\,, \tag{9}$$

其中, $\Omega_{\rm pix}$为像素立体角.

经过时间$t_{\rm obs}$, 对$n_{\rm pix}$个像素进行采样, 黄道光噪声可表示为:

$$\sigma_{\rm bg} = \sqrt{n_{\rm Zodi}n_{\rm pix}t_{\rm obs}}\,. \tag{10}$$

2.2.3 暗电流噪声

探测器主要的热噪声来源是暗电流(dark current), 指探测器没有接收光子时仍会产生的微小电流. 暗电流大小与温度有关, 并随积分时间累积, 同样服从泊松分布.

设单位时间单个像素上暗电流平均大小为$n_{\rm dc}$(单位为e$^-$ · s^{-1} · pixel^{-1}), 经过曝光时间$t_{\rm obs}$, 对$n_{\rm pix}$个像素进行采样, 暗电流噪声可表示为:

$$\sigma_{\rm dc} = \sqrt{n_{\rm dc}n_{\rm pix}t_{\rm obs}}\,. \tag{11}$$

2.2.4 读出噪声

CCD读出信号时将像素上的电荷转换为数值会产生读出噪声(readout noise). 各个像素上的读出噪声不均匀, 通常用电子数的均方根(root mean square, RMS)来表征, 设为$n_{\rm ro}$(单位为e$^-$RMS/pixel), 则对$n_{\rm pix}$个像素进行采样, 读出$n_{\rm exp}$次, 读出噪声可表示为:

$$\sigma_{\rm ro} = \sqrt{n_{\rm pix}n_{\rm exp}}n_{\rm ro}\,. \tag{12}$$

2.2.5 抖动噪声

根据2.1.4节所述仪器抖动的影响, 抖动使得恒星在探测器上的位置发生偏移, 而不同位置对应了不同的PSF和PRF, 因此会给测光带来额外的噪声, 即抖动噪声. 我们通过生成多组随机的抖动序列, 对同样的目标源进行重复测量, 给出CCD像素接收到的总电子数的序列$N_{\lambda,\rm s}$Array, 计算其均方差(standard deviation, STD)作为$t_{\rm obs}$曝光时间、$n_{\rm pix}$个像素内的抖动噪声:

$$\sigma_{\rm jt} = {\rm STD}(N_{\lambda,\rm s}{\rm Array})\,, \tag{13}$$

其中, $N_{\lambda,\rm s}$Array由(5)式多次计算给出.

2.3 信噪比计算模型

根据2.1节和2.2节所述, 目标源信号由(5)式给出, 噪声由(6)–(13)式给出. 总噪声为:

$$\sigma_{\rm tot} = \sqrt{\sigma_{\rm PS}^2 + \sigma_{\rm bg}^2 + \sigma_{\rm dc}^2 + \sigma_{\rm ro}^2 + \sigma_{\rm jt}^2}\,, \tag{14}$$

其中, $\sigma_{\rm PS}$、$\sigma_{\rm bg}$、$\sigma_{\rm dc}$、$\sigma_{\rm ro}$和$\sigma_{\rm jt}$分别为泊松噪声、天光背景噪声、暗电流噪声、读出噪声和抖动噪声.

信噪比计算为:

$${\rm SNR} = \frac{N_{\lambda,\rm s}}{\sigma_{\rm tot}} = \frac{N_{\lambda,\rm s}}{\sqrt{N_{\lambda,\rm s}+n_{\rm bg}n_{\rm pix}t_{\rm obs}+n_{\rm dc}n_{\rm pix}t_{\rm obs}+n_{\rm ro}^2n_{\rm pix}t_{\rm obs}+\sigma_{\rm jt}^2}}\,, \tag{15}$$

其中, 各参数的含义与2.1和2.2节中相同.

上述计算得到的恒星测光信噪比可以用来判断在该模式下能否探测到系外行星. 类太阳恒星周围热木星的典型凌星深度约为1%量级, Kepler通常将判定行星候选体的凌星信号信噪比限制为SNR > 7.1[15], 也有工作探讨了SNR ∼ 6的合理性[16]. 这里我们选取了SNR ⩾ 6作为凌星信号探测的阈值. 将热木星凌星深度的典型值和凌星信号信噪比的阈值相除, 我们认为当恒星观测的噪声水平⩽ $\frac{1}{600}$, 即恒星测光信噪比⩾ 600时, 有能力探测到系外类木行星.

3 孔径测光模拟与测试结果

本节将介绍特定波段下, CSST孔径测光精度模拟的测试结果及其分析. 首先, 介绍测试中使用的系统及目标源参数, 随后说明测光孔径选取的方式. 接着, 将详细讨论不同的仪器抖动和像素响应参数对稳定性误差的影响, 并考虑参考星较差对测光精度的提升. 最后, 对比两个子波段的模拟结果, 说明本测试外推到宽波段测光的合理性.

3.1 参数设置

CSST多色成像与无缝光谱巡天模块的焦面布局如图4所示, 主焦面覆盖中心1.1° × 1.2°的视场, 包含NUV、u、g、r、i、z和GU、GV、GI等波段(具体参见CSST科学白皮书[2]), 精细导星组件(fine guidance sensor, FGS)和波前传感器(wavefront sensor, WFS)焦面分布在两侧的辅助成像区, 天体定标(photometric calibration)组件和短波红外(near-infrared, NIR)焦面分布在其余的视场. 我们选取i波段滤光片对应的一片探测器, 其在探测器焦平面上的位置在图4中以红框标出, 以其一个中心波长706.1 nm、带宽32.2 nm的子波段为例进行测试. CSST巡天凝视模式单次曝光时间为300 s, 根据探测器满阱电子数, 选取一颗i波段AB星等为16 mag (辐射流密度为8.69×10^{-15} erg · s^{-1} · cm^{-2} · nm^{-1})的恒星作为目标源. 抖动频率取为20 Hz. 计算中使用的CSST主光学系统和多色成像模块的相关技术指标如表1所示.

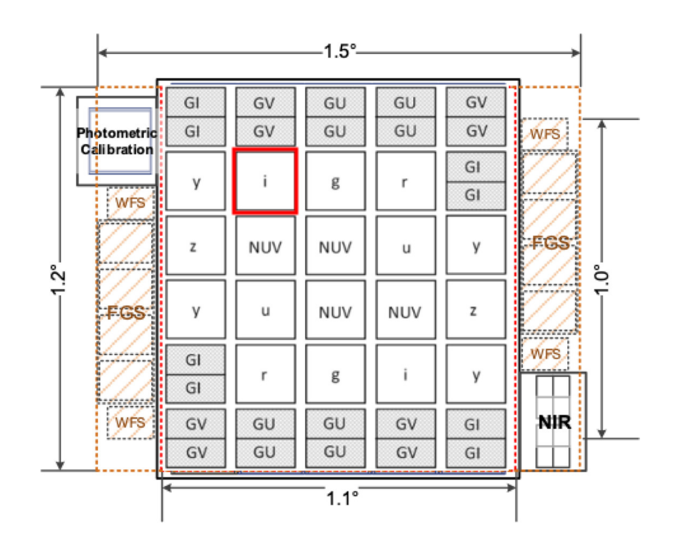


图 4 多色成像与无缝光谱的滤光片在焦平面上的排布. 红色方框内为本文的测试波段[3].

Fig. 4 CSST filter arrangement on the focal plane of multi-color photometry and slitless spectroscopy survey module. Red square: test band in our work[3].

3.2 测光孔径选取

测光孔径是进行光度提取的重要参数, 确定并选择最佳测光孔径值是精确测光的必要条件. 如果孔径选取太小, 则不能包含足够多的目标源光子, 且星象中心的微小偏移都会给测光带来较大的误差; 如果孔径选取太大, 那么天光背景等噪声会过多地留在孔径内, 特别是对于暗弱的目标源会显著降低测光精度. 另外, 对于密集星场, 过大的孔径也可能引入其他源的流量. 通常, 测光孔径的尺寸选为PSF半峰全宽(full width at half-maximum, FWHM)的3–4倍. 图5展示了信噪比和各项噪声与信号的比值与测光孔径的大小和形状的关系. 简单的测试显示, 选择正方形和圆形孔径分别来进行测光, 如果正方形边长与圆形直径相同, 则正方形孔径的测光精度与圆形孔径的$\frac{4}{\pi}$倍相近; 如果选用像素数目相近的正方形和圆形孔径测光, 则得到的信噪比相

[2]CSST空间站多功能光学设施科学白皮书第1.2版第2章.

[3]CSST空间站多功能光学设施科学白皮书第1.2版图2.2.3.

近. 如图5左图所示, 品红色圆点显示了直径为11 pixel的圆形孔径的测光信噪比, 红色圆点显示了直径为12.4 pixel的圆形孔径的测光信噪比. 这说明测光精度与测光孔径内包含的像素数目有关, 而对孔径的形状不敏感. 为简化问题, 本文选取了正方形的测光孔径来进行模拟仿真. 在实际测光中, 每张图像的抖动可能使星象产生随机方向上的拉长, 破坏星象的对称性, 采用对称的孔径测光未必是最优选择, 需要结合星象采取PSF拟合的方法确定更准确的测光孔径, 以提高测光精度. 此外, 通过参考星的较差测光也可以一定程度上抵消随机抖动偏移带来的影响(详见3.5节).

表 1 模拟中使用的主要技术参数[2]

Table 1 Main technical parameters in our simulation[2]

Characteristic	CSST Performance
Diameter	2 m
Focal Length	28000 mm
Field of View	1.7 deg^2
Wavelengths	0.69–0.83 μm (i band)
Pixel Plate Scale	0.074″
Module Efficiency	0.62 @ i band
Accuracy of Image Stabilization	0.05″@300 s
Dark Current	0.02 $e^- \cdot s^{-1} \cdot pixel^{-1}$@detectortemperature
Readout Noise	5 $e^- \cdot pixel^{-1}$
Full Well	90 ke^- (average)

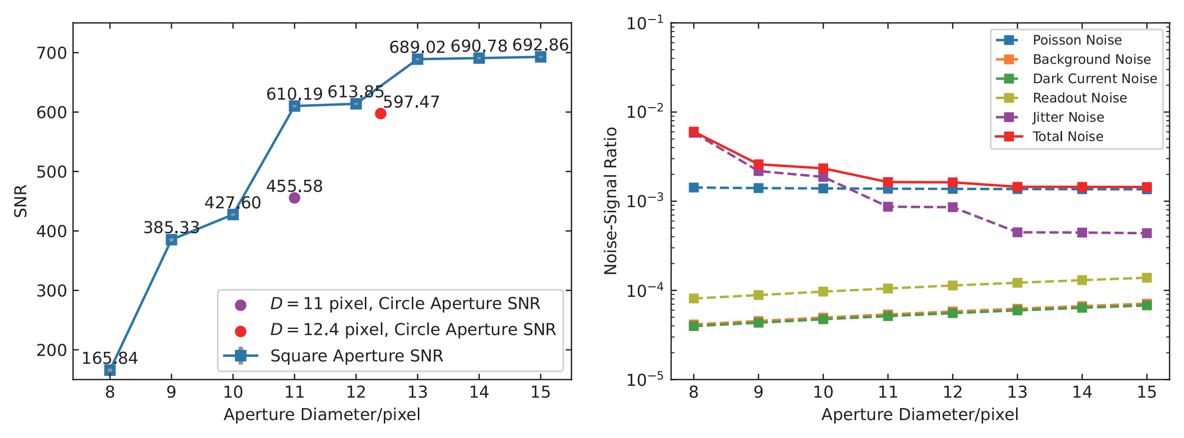


图 5 左图: 蓝色曲线显示了信噪比随正方形测光孔径(8–15 pixel)的变化. 测光孔径值⩾ 11 pixel时, 信噪比⩾ 600. 测光孔径值⩾ 13 pixel时, 信噪比在∼ 700的水平趋于稳定. 品红色圆点显示了直径D为11 pixel的圆形孔径的测光信噪比, 红色圆点显示了直径D为12.4 pixel的圆形孔径的测光信噪比. 右图: 各项噪声与信号的比值随正方形测光孔径(8–15 pixel)的变化. 测光孔径⩾ 11 pixel时, 噪声以泊松噪声为主导.

Fig. 5 Left: Blue curve is the correlation between variables SNR and aperture size in a square area of 8–15 pixel. We get an SNR ⩾ 600 with aperture size ⩾ 11 pixel. SNR keeps unchanged around 700 with aperture size ⩾ 13 pixel. Magenta dot is the SNR of a circular aperture with a diameter (D) of 11 pixel. Red dot is the SNR of a circular aperture with a diameter (D) of 12.4 pixel. Right: Correlation between variables noise-signal ratio and aperture size in a square area of 8–15 pixel. Total noise is dominated by Poisson noise with aperture size ⩾ 11 pixel.

在本节选取的波长处, 不考虑抖动效应时, 点扩散函数的FWHM约为2.8 pixel, 加入抖动的影响后, FWHM的平均值增加约为3.5 pixel. 因此, 我们在8–15 pixel范围内寻找最佳孔径值.

我们选取CSST的仪器抖动参数(单次抖动标准差$\sigma_{\rm CSST} \approx 0.007$ pixel), 以Kepler像素模型作为像素内响应函数, 在此基础上给不同的像素间增加了1%的随机差异, 进行10组随机测试, 取其均值作为恒星信号, 其均方根作为抖动噪声. 图5显示了测光信噪比和各项噪声大小随测光孔径的变化. 需要说明的是, 信噪比的相对误差在1%以下, 因此在图中误差棒表现得不明显.

根据测试结果可知, 增大孔径可以较大幅度地降低抖动噪声, 同时泊松噪声、天光背景、暗电流和读出噪声等会略微增加. 在孔径值$<$ 11 pixel时, 仪器的抖动噪声占主导, 而孔径值$\geqslant$ 11 pixel时, 信噪比更多地取决于泊松噪声. 孔径值$\geqslant$ 11 pixel时, 测光信噪比$\geqslant$ 600. 孔径值取13 pixel时, 孔径内已覆盖了目标源约92%的流量. 孔径值$\geqslant$ 13 pixel时, 增大孔径对信噪比的提高幅度较小, 信噪比在$\sim$ 700趋于稳定. 结合理想的测光信噪比来看, 正方形孔径边长选取为11–13 pixel均是较为合理的. 在本文的工作中, 出于计算效率的考虑, 我们以边长为11 pixel的正方形孔径为例进行后续的测试.

3.3 仪器抖动振幅对抖动噪声的影响

本节测试了仪器抖动振幅对测光精度的影响. CSST仪器单次抖动的STD为$\sigma_{\rm CSST} \approx 0.007$ pixel, 我们选取了CSST抖动均方差参数的10倍、 5倍、2倍、1倍和0.5倍(记为10×、5×、2×、1×、0.5×), 分别进行10组随机测试, 计算不同抖动序列产生的噪声和信噪比, 结果如图6所示. 为了说明抖动的单一影响, 我们设CCD上各处像素响应均匀. 需要说明的是, 信噪比的相对误差在1%以下, 因此在图中没有把误差棒表现出来.

根据测试结果可知, 随着抖动序列的均方差减小, 抖动噪声显著降低, 测光精度显著提高. 这是由于当抖动振幅过大时, 星象每个时刻的位置存在较大范围的随机偏移, 在较长的曝光时间积分效应下, 累计产生了很大的抖动噪声. 在抖动均方差取2–10倍$\sigma_{\rm CSST}$时, 降低抖动均方差可以显著提高信噪比. 在抖动均方差取$\leqslant \sigma_{\rm CSST}$时, 信噪比$>$ 600, 且继续降低抖动均方差对信噪比的提升幅度较小. 因此, 我们应尽可能降低抖动振幅, 使其引起的抖动噪声明显小于光子噪声. 这个结果证明目前CSST的抖动指标是合理的. 需要说明的是, 实际观测中, 当抖动使星象偏离初始位置较远时, 望远镜可能会主动控制将星象拉回初始位置附近, 本节未考虑这种非连续性的突然变化.

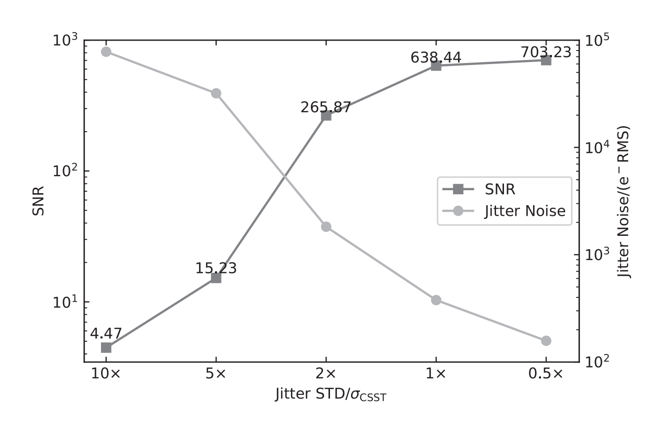


图 6 抖动噪声(浅灰圆点)和测光信噪比(深灰方块)随抖动序列标准差的变化. 抖动均方差取值从$10\sigma_{\rm CSST}$到$2\sigma_{\rm CSST}$, 信噪比显著提升. 在抖动均方差取$1\sigma_{\rm CSST}$以下时, 信噪比随抖动均方差降低而提升的幅度较小.

Fig. 6 Correlation between variables jitter noise (lightgrey dot) / SNR (dimgrey square) and jitter STD. There is a sharp rise in SNR with jitter STD from $10\sigma_{\rm CSST}$ to $2\sigma_{\rm CSST}$. SNR rises slightly with the decrease of jitter STD $\leqslant 1\sigma_{\rm CSST}$.

3.4 像素不均匀性对抖动噪声的影响

根据2.1.4节的计算模型, 抖动造成的影响和像素不均匀性是紧密联系的. 本节测试像素不均匀性对测光精度的影响. 我们分别选取以下6组像素响应函数进行测试:

(1)像素内、像素间各处响应均匀, 记为“uniform”;

(2)像素内响应不均匀, 像素内响应函数(IPRF)符合Kepler像素模型, 各像素间IPRF一致, 记为“IPRF + 0.00”;

(3)像素内响应不均匀, IPRF符合Kepler像素模型, 像素间响应也不均匀, 在Kepler IPRF的基础上对不同的像素间增加了1%的随机差异, 记为“IPRF +

0.01”;

(4)像素内响应不均匀, IPRF符合Kepler像素模型, 像素间响应也不均匀, 在Kepler IPRF的基础上对不同的像素间增加了2%的随机差异, 记为“IPRF + 0.02”;

(5)像素内响应不均匀, IPRF符合Kepler像素模型, 像素间响应也不均匀, 在Kepler IPRF的基础上对不同的像素间增加了5%的随机差异, 记为“IPRF + 0.05”;

(6)像素内响应不均匀, IPRF符合Kepler像素模型, 像素间响应也不均匀, 在Kepler IPRF的基础上对不同的像素间增加了10%的随机差异, 记为“IPRF + 0.10”.

对于以上6种PRF, 我们均选取CSST的仪器抖动参数, 分别进行10组随机测试, 计算不同PRF产生的抖动噪声和信噪比, 结果如图7所示. 需要说明的是, 信噪比的相对误差低于1%量级, 因此在图中没有把误差棒表现出来.

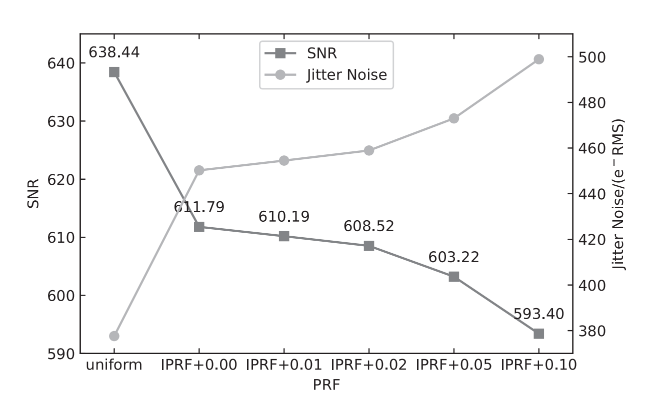


图 7 抖动噪声(浅灰圆点)和测光信噪比(深灰方块)随像素响应函数的变化. 信噪比随像素不均匀性增大而小幅度降低.

Fig. 7 Correlation between variables jitter noise (lightgrey dot) / SNR (dimgrey square) and PRF. SNR falls slightly with the increase of pixel response inhomogeneity.

根据测试结果可知, 随着像素的不均匀性增加, 抖动噪声呈增大趋势, 信噪比呈降低趋势, 但变化不显著, 没有量级上的差异. 在像素间IPRF的随机差异< 10%时, 信噪比均⩾ 600. 与3.3节对比可知, 采用CSST默认仪器抖动振幅和Kepler IPRF模型, 抖动振幅对抖动噪声的影响远大于像素不均匀性的影响, 但仍可通过降低像素的不均匀性在一定程度上提高测光精度.

3.5 较差测光精度

利用参考星开展较差测光可以显著提高测光精度, 在地面上即可实现相对测光精度达到或优于0.001[17–18]. 我们随机选取了目标源附近100 pixel以内、星等相差在1 mag以内的5颗参考星, 采用CSST的仪器抖动参数(单次抖动标准差$\sigma_{\rm CSST} \approx$ 0.007 pixel), 以Kepler像素模型作为像素内响应函数, 在此基础上给不同的像素间增加了1%的随机差异, 进行10组随机测试. 随后, 我们对参考星和目标星分别测光, 利用参考星的平均星等扣除部分与时间相关的噪声.

在正方形测光孔径边长为11 pixel的情况下, 模拟计算显示较差法可以将抖动噪声降低至原来的66%左右. 较差法对测光信噪比和各项噪声与信号比值的影响如图8所示. 图8左图显示了较差前后信噪比的变化. 需要说明的是, 信噪比的相对误差在1%以下, 因此在图中没有把误差棒表现出来. 图8右图显示了较差前后各项噪声随孔径值的变化, 其中主要影响是较差测光降低了抖动噪声.

根据测试结果可知, 较差测光可以一定程度上降低仪器抖动带来的误差, 提高测光信噪比. 在测光孔径值⩾ 11 pixel时, 通过较差可以使信噪比⩾ 600. 孔径值⩾ 13 pixel时, 较差测光对信噪比的提升较小, 信噪比在∼ 700的水平趋于稳定. 因此在实际测光观测中, 可以采用较差测光的方式提升测光精度.

3.6 拓展到宽波段情形

前文中我们均是对中心波长为706.1 nm、带宽为32.2 nm的子波段(记为Band1)进行测试, 而CSST i波段的实际波长范围为0.69–0.83 μm. 由于不同波长下恒星PSF、探测器PRF等参数有所差别, 需要研究Band1的结果能否适用于整个波段.

本节对同一片CCD上另一个中心波长为822.6 nm、带宽为14.8 nm的子波段(记为Band2)进行测试. 除中心波长和带宽以外, 其他参数设置与前文相同, 即: 采用CSST的默认仪器抖动参数、

Kepler像素模型作为IPRF, 像素间考虑1%的随机差异, 进行了10组测试. 为了更好地对比结果, 我们将Band2的结果缩放到Band1的中心波长和带宽取值(记为Band2 Normalized). 表2显示了Band1、Band2和Band2 Normalized这3组波段各项噪声和信噪比的模拟结果.

根据表2结果, 对波长和带宽做归一化后, Band1和Band2两个子波段的结果整体基本一致, 主要的差别体现在抖动噪声项, 这主要是由于不同子波段内恒星PSF的分布有所不同导致的, 并且不同子波段内探测器的PRF也有所不同. 通常可以通过对波段内多个子波段进行同样的估算, 来估算整个波段内的噪声值和测光精度. 并且, 两个子波段的信噪比都达到600左右, 考虑到参考星较差可以一定程度地提高测光精度, 我们认为在CSST的多色测光模块, 有能力探测到木星大小的系外行星.

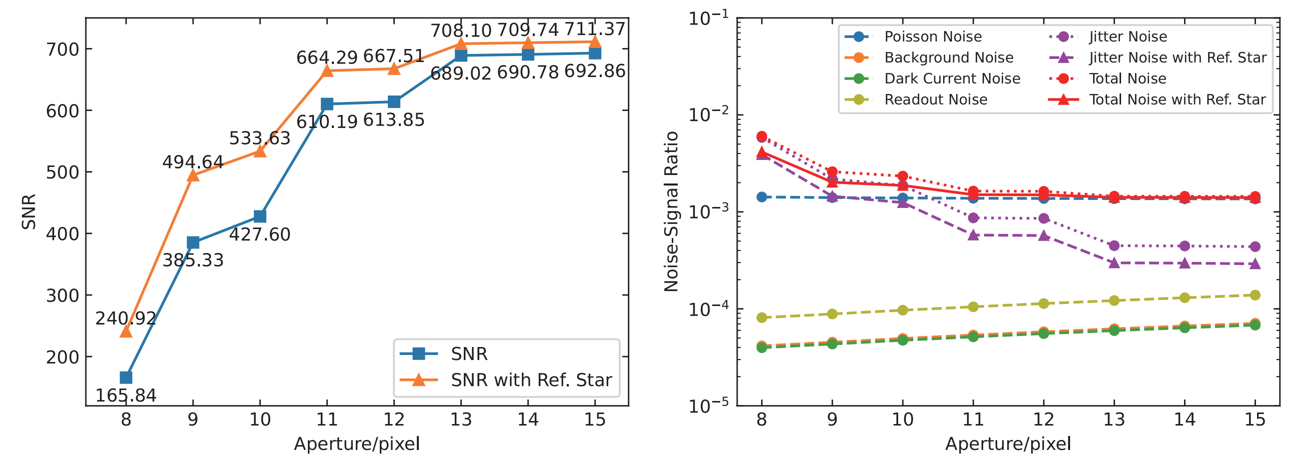


图 8 左图: 有(橙色圆点)无(蓝色方块)参考星信噪比的变化. 较差测光可以提高信噪比, 特别是孔径值⩽ 11 pixel时. 右图: 有无参考星各项噪声的变化. 紫色和红色的虚线分别表征了参考星较差降低了抖动噪声和总噪声. 较差测光可以在∼ 66%的水平上降低抖动噪声.

Fig. 8 Left: SNR with (orange dot) and without (blue square) reference stars. The SNR values are larger for the case of differential photometry, especially for the cases with aperture size ⩽ 11 pixel. Right: Noise-signal ratio with and without reference stars. Purple and red dashed lines show the decrease of jitter noise and total noise respectively using reference stars. Jitter noise drops to ∼ 66% with differential photometry.

表 2 不同子波段信号和噪声对比. $N_{\lambda,s}$为目标源信号总电子数, σ_{PS}、σ_{bg}、σ_{dc}、σ_{ro}和σ_{jt}分别为泊松噪声、天光背景噪声、暗电流噪声、读出噪声和抖动噪声.

Table 2 Signal and noise in different sub-waveband. $N_{\lambda,s}$: the total number of electrons from the object, σ_{PS}: Poisson noise, σ_{bg}: sky background noise, σ_{dc}: dark current noise, σ_{ro}: readout noise, σ_{jt}: jitter noise.

Bands	$N_{\lambda,s}$/ e^-	σ_{PS}/ (e^-RMS)	σ_{bg}/ (e^-RMS)	σ_{dc}/ (e^-RMS)	σ_{ro}/ (e^-RMS)	σ_{jt}/ (e^-RMS)	σ_{tot}/ (e^-RMS)	SNR
Band1	5.24×10^5	723.78	28.13	26.94	55.00	454.50	858.52	610.19
Band2	2.05×10^5	452.96	18.27	26.94	55.00	219.51	508.58	403.43
Band2 Normalized	5.20×10^5	721.14	28.13	26.94	55.00	556.38	914.46	568.70

4 总结与讨论

本文基于CSST主巡天的多色成像模块凝视观测, 模拟了预计接收的恒星信号和不同来源的噪声贡献. 我们特别考虑了仪器抖动和像素不均匀性导致的噪声对测光精度的影响. 本文主要结论总结如下:

(1)泊松噪声和抖动噪声是CSST测光中的重要噪声源. 在测光孔径较小(边长$<$ 11 pixel)时, 抖动噪声的大小对测光信噪比具有主导作用. 增大测光孔径可以有效地降低抖动噪声, 基于测试波段恒星的点扩散函数半峰全宽, 我们提出正方形测光孔径的边长取为11–13 pixel比较合适;

(2)不同抖动振幅的测试结果显示, 抖动序列标准差值的大小对抖动噪声造成显著影响. 因此, 需要尽可能地控制望远镜的稳像精度指标, 以提高测光精度. 根据模拟测试, 在目前CSST的抖动参数指标(单次抖动标准差$\sigma_{\rm CSST} \approx 0.007$ pixel)下, 时序测光的信噪比高于600, 可以满足系外行星探测, 特别是热木星探测的精度要求;

(3)不同像素响应函数的测试结果显示, 像素不均匀性对抖动噪声造成的影响是不可忽视的, 但未对抖动噪声的量级造成影响. 在像素间IPRF的随机差异$\leqslant$ 10%时, 信噪比均高于600. 我们需要尽量选取像素不均匀性较低的探测器, 从而在一定程度上提高测光精度;

(4)参考星较差测光的测试结果显示, 选取5颗星等相近的参考星进行较差测光可将抖动噪声降为约原来的66%水平, 从而使测光信噪比高于600. 这种较差测光的方式在实际观测和数据处理中也经常应用;

(5)对CSST的i波段两个不同子波段的测试结果显示, 两个波段的噪声水平在归一化后表现出较好的一致性, 并且测光信噪比接近600. 考虑到较差测光对测光精度的提高, 我们认为现有的测光模式可以在该波段内进行系外行星的探测. 后续可以通过对该波段内多个子波段进行同样的估算, 再结合恒星光谱叠加来估算整个波段内的测光精度.

本文虽然主要讨论的是像素不均匀性和指向稳定性对时序测光精度的影响, 也可以应用到光谱仪的探测中. 噪声分析时, 对天光背景噪声的估算以黄道光为主, 忽略了地球和月球的辐射等其他背景源的影响, 根据HST的天光背景测量数据[14], 本文可能对天光背景有2–3倍的低估, 但仍然远低于泊松噪声和抖动噪声, 因此不影响最终结论. 在抖动噪声的模拟中, 选取的目标源位置比较接近CCD中央区域, 参考星在目标源周围100 pixel以内的位置, 暂时没有考虑目标源位于不同初始位置对结果的影响. 我们选取的像素响应函数是基于Kepler像素加入随机误差得到的, 可能与最终CSST的探测器性能有所出入. 目前研究的测光波段限于CSST的i波段, 未来可以用类似的方法对其他波段进行估计.

由于探测器满阱电子数的限制, 我们选取的目标源i波段星等在16 mag (AB星等)左右. 考虑到未来要完成以系外行星大气为目标的观测, 而可进行行星大气观测的主星V星等通常在7–12 mag范围内, 且行星大气透射光谱特征相对主星信号极弱, 至少需要达到10^{-3}–10^{-4}量级, 这对测光精度的要求非常高, 凝视模式的观测将不能满足需求. 为了解决这个问题, CSST可能采用漂移模式进行长时间的成像和无缝光谱观测. 后续我们将开展这部分的模拟计算工作, 以更好地帮助CSST实现系外行星探测和系外行星大气观测的科学目标.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 提高了文章的质量.

参考文献

[1] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Science, 2010, 327: 977
[2] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. JATIS, 2014, 1: 014003
[3] Prusti T, de Bruijne J H J, Brown A G A, et al. A&A, 2016, 595: A1
[4] Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. RAA, 2012, 12: 1197
[5] 詹虎. 科学通报, 2021, 66: 1290
[6] Rackham B V, Apai D, Giampapa M S. ApJ, 2018, 853: 122
[7] Waldmann I P, Tinetti G, Rocchetto M, et al. ApJ, 2015, 802: 107

[8] Samadi R, Deru A, Reese D, et al. A&A, 2019, 624: A117

[9] Sullivan P W, Winn J N, Berta-Thompson Z K, et al. ApJ, 2015, 809: 77

[10] Sarkar S, Madhusudhan N, Papageorgiou A. MNRAS, 2020, 491: 378

[11] Shepard D. Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference. New York: ACM Press, 1968: 517

[12] Vorobiev D, Ninkov Z, Caldwell D, et al. Proceedings of SPIE 10698, Space Telescopes and Instrumentation 2018: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Austin: SPIE, 2018: 106985J

[13] Pascale E, Waldmann I P, MacTavish C J, et al. ExA, 2015, 40: 601

[14] Prichard L, Welty D, Jones A. STIS Instrument Handbook: Version 21.0. Baltimore: STScI, 2022: 117

[15] Batalha N M, Rowe J F, Bryson S T, et al. ApJS, 2013, 204: 24

[16] Kunimoto M, Matthews J M, Rowe J F, et al. AJ, 2018, 155: 43

[17] Everett M E, Howell S B. PASP, 2001, 113: 1428

[18] 石亚卿, 王炜, 赵景昆. 中国科学院大学学报, DOI: 10.7523/j.ucas.2022.034

Analysis of the Precision of CSST Time-domain Photometric Observation

WANG Wan-hao[1,2,3] LIU Hui-gen[1,2,3] ZHOU Ji-lin[1,3]

(1 School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023)
(2 Laboratory of Pinghu, Beijing Institute of Infinite Electric Measurement, Pinghu 314000)
(3 Key Laboratory of Modern Astronomy and Astrophysics, Ministry of Education, Nanjing 210023)

ABSTRACT The Chinese Survey Space Telescope (CSST) is the first large space optical telescope of China. It will perform scientific observations and yield important scientific results, e.g. multi-color photometry to find and characterize exoplanets. The precision of time-domain photometry affected by various astrophysical and instrument noises is crucial for exoplanet detection and characterization. This paper constructs a time-domain model to simulate the stellar signal and various noises based on the main technical parameters of CSST published so far. The precision of photometry is analyzed by modeling the signal and noises for an example of the gazing mode in the i band. We investigate and discuss the contribution of various noises while doing aperture photometry, especially the jitter noise caused by pointing jitter and pixel response inhomogeneity. The test results also provide the recommended size of aperture photometry. Jitter noise can be suppressed by reducing jitter amplitude and uniforming pixel or by using differential photometry with reference stars. Our simulation results can be applied to the precision prediction of time-domain photometry, the refinement of CSST instrumental specifications, evaluation of exoplanet detection capabilities, and data reduction progress for CSST.

Key words telescopes, planets and satellites: detection, techniques: photometric, methods: numerical